



TITLE:

A structural optimization methodology for multiscale designs considering local deformation in microstructures and rarefied gas flows in microchannels(Abstract_要旨)

AUTHOR(S):

Sato, Ayami

CITATION:

Sato, Ayami. A structural optimization methodology for multiscale designs considering local deformation in microstructures and rarefied gas flows in microchannels. 京都大学, 2019, 博士(工学)

ISSUE DATE:

2019-03-25

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.k21757>

RIGHT:

京都大学	博士（工学）	氏名	佐藤綾美
論文題目	A structural optimization methodology for multiscale designs considering local deformation in microstructures and rarefied gas flows in microchannels（微視構造における局所変形と微細流路における希薄気体流れを考慮したマルチスケール設計のための構造最適化法）		
<p>（論文内容の要旨）</p> <p>本論文は、微小な系における物理的挙動を利用した高機能デバイスの創成を目的として、弾性微視構造における局所変形と微細流路における希薄気体流れを対象としたマルチスケール設計のための構造最適化法に関する研究をまとめたものであって、4章から成っている。</p> <p>第1章は序論であり、まず弾性場問題を対象としたマルチスケール構造最適化に関する研究の概観とその現状の課題を述べている。次に、流れ場問題に対してマルチスケール構造最適化の概観と適用する際に検討すべき課題について言及し、本論文の目的を示している。加えて、構造最適化の中でも最も設計自由度の高いトポロジー最適化について代表的な方法論を紹介し、その基本的な考え方や最適化計算を行う際のアルゴリズムについて説明している。</p> <p>第2章では、マイクロポーラ弾性体近似を利用したマルチスケール構造最適設計法を提案している。マイクロポーラ弾性体は変位に加えて回転の自由度を有しており、局所的な変形モードを持つ微視構造の連続体近似に適することが知られている。そこで本章では、格子構造の連続体近似にマイクロポーラ弾性体を用いることにより、格子構造のマルチスケール構造最適化を精度よくかつ効率的に行う手法を構築している。すなわち、格子構造の構成要素である梁の幅の空間的分布を設計変数とし、マクロスケールでの特定の荷重条件に対して、体積制約の下、巨視的な剛性を最大化する最適化問題を定式化するとともに、その定式化に基づき最適化アルゴリズムを開発している。本提案手法では、格子構造全体をマイクロポーラ弾性体としてモデル化することにより、局所的に曲げ変形を生じる格子構造に対して巨視的な挙動を精度よく評価することが可能であり、かつマイクロポーラ弾性体の材料特性が設計諸元である梁の幅の関数として陽に表現されることから、最適化計算を効率よく行うことができる。そして、数値例により提案手法の妥当性の検証を行った結果、主応力方向と軸方向が一致する梁の幅が太くなるという力学的に妥当な構造が得られることを示している。また、最適構造では梁の幅の値が側面制約の上限と下限に集中することを確認している。この原因として、体積が梁の幅に比例するのに対し曲げ剛性が梁の幅の3乗に比例するという事実から、体積制約下において中間値を取ることは目的汎関数に対して不利になるための結果と考察している。さらに、単位構造のサイズの違いを考慮した最適構造を得ることに成功している。</p> <p>第3章では、流れ場を対象としたマルチスケール構造最適化の構築を目的として、希薄気体流れを対象としたトポロジー最適化の構築を行っている。ミクロなスケールとして流路内の気体が希薄な状態となるスケールで流路の設計を行えば、希薄気体流れ特有の性質を生かしたデバイスや材料の設計が可能となると考えられる。そこで本章では希薄気体流れを取り扱うために、従来の一般的な流体力学に基づく方法とは異なり、分子気体力学に基づくトポロジー最適化の構築を行っている。流体問題を対象としたトポロジー最適化では流路構造が陰的に表現され、気体と物体の界面を抽出し境界条件を厳密に課すのは数値実装上困難である。本提案手法では物体領域を仮想的</p>			

京都大学	博士（工学）	氏名	佐 藤 綾 美
<p>な気体が占めているとみなして流れ場と支配方程式を拡張することで、界面近傍での流れを模擬している。この拡張した支配方程式に基づいて最適化問題の定式化と最適化アルゴリズムの構築を行っている。そして数値例により、拡張した支配方程式及び導出した設計感度の妥当性を確認している。また、本提案手法を曲がり管設計問題と熱駆動ポンプ設計問題に適用し、その有効性を示している。その結果、曲がり管設計問題では、気体の希薄度を表すクヌーセン数に依存して、最適流路構造の曲率が変化することを確認している。一方熱駆動ポンプ設計問題では、密度法とレベルセット法に基づく手法の二つの異なる手法を用いてトポロジー最適化を行っているが、いずれによっても希薄気体流れ特有の温度勾配によって流れを誘起されるような流路構造が得られている。なお密度法を用いた場合には、流体と物体の中間状態を表すグレースケール領域の存在が、流れ場に対して大きな影響を与えることも確認している。</p> <p>第4章は結論であり、本論文で得られた成果について要約するとともに、本研究の今後の展望について述べている。</p>			

(論文審査の結果の要旨)

本論文では、微小な系における物理的挙動を利用した高機能デバイスの創成を目的として、弾性微視構造における局所変形と微細流路における希薄気体流れを対象としたマルチスケール設計のための構造最適化法に関する研究について論じた結果をまとめたものである。得られた主な結果は次のとおりである。

1. 格子構造を対象としたマイクロポーラ弾性体への連続体近似に基づくマルチスケール構造最適化法を提案した。局所的な変形モードを持つ格子構造に対してマイクロポーラ弾性体への連続体近似を行うことにより、巨視的な物理特性を精度よくかつ効率的に評価することが可能となった。この連続体近似に基づき、格子構造の巨視的な剛性を最大化する最適化問題の定式化及び最適化アルゴリズムの構築を行った。そして幾つかの数値例により、提案した手法により得られた最適格子構造が力学的に妥当であることを示した。また、格子構造の単位サイズを反映した最適構造が得られた。
2. 流れ場問題を対象としたマルチスケール構造最適化を目的として、希薄気体流れに対するトポロジー最適化を提案した。トポロジー最適化の計算過程において、陰的に表現された気体と固体の界面を抽出することなく壁面近傍の流れを模擬するため、物体を仮想的な気体とみなし流れ場及び流れの支配方程式を物体領域まで拡張する手法を構築した。そして、拡張した支配方程式に基づいて最適化問題の定式化及び最適化アルゴリズムの構築を行った。さらに数値例により、まず拡張した支配方程式と導出した設計感度の妥当性を示した。次に、提案した最適化手法を曲がり管及び熱駆動ポンプ設計問題へと適用し、いずれの設計問題でも物理的に妥当な最適流路構造が得られたことから、手法の有効性を示した。

以上のように本論文は、弾性場と流れ場に対して微小な系での物理的挙動を考慮したマルチスケール設計のための構造最適化法を構築し、数値例によりその妥当性と有効性を示しており、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。また、平成31年2月8日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。